

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tuotantopainotteinen konetekniikka

2013

Mika Mäkinen

VALONMITTAUSLABORATO- RIIDEN OPTIMOINTI



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mika Mäkinen

VALONMITTAUSLABORATORIOIDEN OPTIMOINTI

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli optimoida toimeksiantaja Ledil Oy:n kolme erilaista valonmittauslaboratoriota. Optimointiin kuului myös kartoitus. Kartoituksella pyrittiin saamaan selkeä kuva siitä, paljonko tulokset vaihtelevat, kun sama asia mitattiin eri laitteella.

Valonmittauslaboratorion tehtävä on luoda numeroarvolla tietoa valonlähteen tuottaman valon jakautumisesta. Useasta laboratoriosta saadaan ulos myös 3D-malli, jota voidaan käyttää apuna valaistuksen simulointiin ennen varsinaista toteuttamista.

Optimointi piti sisällään laitteiden kohtisuoruuksien tarkistuksia ja etäisyystarkistuksia. Yksi laitteista poikkeaa toimintavaltaan jonkin verran muista, ja vaati myös asetusten muuttamista parhaan lopputuloksen saamiseksi.

Optimointien valmistuttua aloitettiin mittaukset, joissa käytettiin pelkkää led-valaisinta sekä sen päälle asetettavia toisio-optiikoita. Toisio-optiikoita käytettiin kolmea erilaista. Tulosten analysoinnissa tarkasteltiin huippuarvoa, puoliarvoa ja 10 %:n arvoa.

Tuloksista ilmenee, että pienistä eroista suurimmat tulivat mitattaessa kapeaa valokuviota. Eron aiheuttaa laitekokonaisuuksien erilaisuus. Tuotannon ohessa sijaitsevalla valonmittauslaboratoriolla suoritettiin myös vertailumittaukset. Mitattavat kappaleet olivat samat kuin talon sisäisessä vertailussa. Vertailussa kävi ilmi, että tämä laite poikkesi muista käytössämme olevista laitteista.

Talon sisäiset laitteet olivat hyvin linjassa toistensa kanssa ja niitä voidaan käyttää huoletta. Tuotannon laboratorio on sellaisenaan käyttökelpoinen, mutta mittauserojen takia on suunniteltu lisätoimia. Niihin kuuluvat operaattorien täydennyspohjat ja säännölliset vertailumittaukset.

ASIASANAT:

led, valonmittauslaboratorio, valokuvio.

Mika Mäkinen

OPTIMIZATION OF LIGHT MEASUREMENT LABORATORIES

This thesis deals with the optimization of three goniophotometers. These devices are used for measurement of light pattern. The commissioner, Ledil Oy develops secondary optics for power leds and the products need to be tested.

The goniophotometers need to be up-to-date and at best possible working condition. If the meters give slightly wrong readings it may distort measurement data. This data needs to be accurate as it is shared in Ledil Oys website to customers.

In order to optimize the goniophotometers the distances between measurement devices needed to be checked. All previously made calibrations had to be resetted as well. When all the settings and distances were corrected, the measurements started. Precision measured led, pre-measured by led manufacturer, was used. Comparison was made between inhouse laboratories and led manufacturers laboratory. The results show that the profile of the light distribution curve was identical but its intensity pike differented about 9%.

Measurements included measurements with secondary optics. Three different lenses were used. These measurement show that narrow light distribution differs more between goniophotometers than wide ones.

The fourth goniophotometer is located at the site of production line. This device was also brought to comparison. The measurements were made with the same optics than above. The results differ from what had been measured in house.

All goniophotometers use quite different technique for measuring. That in mind the in house goniophotometers are close to other measurement results.

KEY WORDS:

Led, goniophotometer, light pattern.

SISÄLTÖ

SANASTO	6
1. JOHDANTO	6
2. VALONMITTAUSLABORATORIO	7
3. LED VALONLÄHTEET	8
4. VALONMITTAUSLABORATORIO 1	10
4.1 Optimointi	11
5. VALONMITTAUSLABORATORIO 2	12
5.1 Optimointi	14
6. VALONMITTAUSLABORATORIO 3	17
6.1 Optimointi	18
7. MITTAUKSIA	20
8. YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34
LIITTEET	6

KUVAT

Kuva 1. Valonmittauslaboratorion laitteet ja niiden paikat.	7
Kuva 2. Erään ledin rakenne.	9
Kuva 3. Laboratorio 1 Kääntyvä taso ja luksimittari.	10
Kuva 4. Kääntöpöydän sekä anturin seinän kohtisuoruuden tarkistus.	11
Kuva 5. Laboratorio 2.	13
Kuva 6. Ennen muutosta.	15
Kuva 7. Muutoksen jälkeen.	15
Kuva 8. Laboratorio 3 kokoonpano.	18
Kuva 9. Keskipisteen laserkohdistus.	19
Kuva 10. Mittausten kulku.	20

TAULUKOT

Taulukko 1. Pelkän ledin keskiarvoistamaton taulukko.	22
Taulukko 2. Arvot ovat keskiarvoistettu.	22
Taulukko 3. Eroavaisuudet prosentteina verrattuna ulkopuoliseen laboratorioon.	23
Taulukko 4. Valokuvio A.	24

Taulukko 5. Keskiarvoistetut arvo.	24
Taulukko 6. Eroprosentit.	25
Taulukko 7. Valokuvio B.	25
Taulukko 8. Keskiarvoistetut tulokset.	26
Taulukko 9. Eroprosentit.	26
Taulukko 10. Valokuvio C.	27
Taulukko 11. Keskiarvoistetut tulokset.	27
Taulukko 12. Eroprosentit.	27
Taulukko 13. Hyötysuhteet mitattuna integroivassa pallossa.	28
Taulukko 14. Hyötysuhteet arvioituna 3:ssa.	28
Taulukko 15. Hyötysuhteet arvioituna 2:ssa.	29
Taulukko 16. Automaattien arvioimien hyötysuhteiden eroprosentit verrattuna integroivaan palloon.	29
Taulukko 17. Pelkkä led mitattuna tuotantolaitoksen laboratoriossa viiteen otteeseen.	30
Taulukko 18. Pelkän led mittauksen tulokset.	30
Taulukko 19. Eroprosentit verrattuna ulkopuolisen tahon tuottamiin tuloksiin.	31
Taulukko 20. Tehtaan laboratorion tulokset valokuvio A-optiikalla verrattuna talon sisäisten tulosten keskiarvoon.	31
Taulukko 21. Tehtaan laboratorion tulokset valokuvio B-optiikalla verrattuna talon sisäisten tulosten keskiarvoon.	32
Taulukko 22. Tehtaan laboratorion tulokset valokuvio C-optiikalla verrattuna talon sisäisten tulosten keskiarvoon.	32

SANASTO

valonvoimamittari	luksimittari; luks (lx) on SI-järjestelmän mukainen yksikkö valaistusvoimakkuudelle [2].
valovirta	SI-järjestelmän mukainen yksikkö valovirralla [4]; Lumen (lm).
puoliarvo	puoliarvo on leveysarvo valokuvion kohdalle; jossa on puolet kirkkaimman pisteen valomäärästä.
10% arvo	valokuvion kohta; jossa kirkkaimpaan pisteeseen nähden on jäljellä 10%.
led	valoa luova puolijohdekomponentti; tehokas valonlähde, jonka vahva puoli on pieni koko, pitkä elinikä ja vähäinen tehontarve; Light emitting diode.
toisio-optiikka	ledissä itsessään on sisäänrakennettuna valonjakoon tarkoitettua optiikkaa; eli primääri optiikkaa, tässä työssä käsiteltävät, ledin päälle asennettavat optiikat ovat toisio-optiikkaa.
lasersäde	valon tyyppi; jossa kaikki valoaallot ovat saman pituisia ja värähtelevät samassa suunnassa ja samalla taajuudella [7].
passiivinen lauhdutin	useimmiten metallinen, rivoitettu kappale; jonka tehtävänä on jäähdyttää haluttu kohde ohikulkevan ilman avulla.
dome	useimpien ledien päällä oleva kupu; joka toimii ensioptiikkana.
huippuarvo	huippu on valokuvion kohta; jossa on suurin intensiteetti, eli candela-arvo.
goniophotometri	valon jakautumista mittaava laite.
.ies ja .ldt	tiedostoformaatteja; jotka pitävät sisällään mitatun valokuvion 3D- mallin.

1. JOHDANTO

Toimin Ledil Oy:n laboratorioinsinöörinä ja minulle ehdotettiin lopputyön aiheeksi valonmittauslaboratorioiden optimointia ja erojen kartoitusta. Laboratorioiden vertailukelpoisuus on tärkeää, jotta voidaan luotettavasti jakaa mittauskuormaa jokaiselle laitteelle. Tulokset julkistetaan yrityksen nettisivuilla ja niiden perusteella tehdään ostopäätöksiä. Täten tulosten pitää olla totuudenmukaisia. Tulosten kartoitukseen liitettiin myös tuotannon omistama laboratorio. Ajatuksena oli saada mittausvastuuta jaettua myös tälle laitteelle.

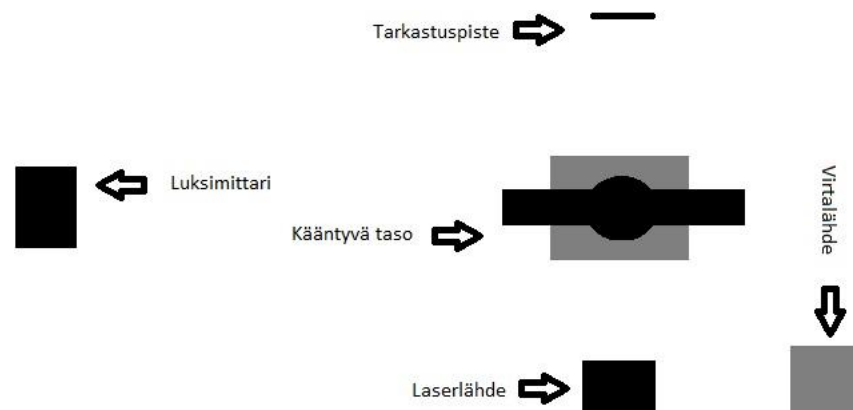
Ledil Oy on suomalainen yritys, jonka ovat perustaneet Tomi Kuntze ja Hannu Hukkanen. Yritys on perustettu vuonna 2002 ja se toimii Salossa Salorankadulla.

Ledil suunnittelee ja alihankintana valmistaa toisio-optiikkaa led-valaisimiin. Ledissä on itsessään usein ensiö-optiikkaa, joten siksi jälkiasennettavat linssit ovat toisio-optiikkaa.

Yrityksellä on toimintaa yhdeksässä maassa, mutta myyntiä on yli 60 maassa. Työntekijöitä on noin 60, joista 12 toimii ulkomailla [10].

2. VALONMITTAUSLABORATORIO

Valonmittauslaboratorio eli goniofotometri on laite, jolla mitataan valonlähteen tuottamaa valokuviota (kuva 1). Mitattavaa valoa voi olla niin ihmiselle näkyvää kuin näkymätöntäkin. Tässä työssä keskityttiin vain näkyvää valoa mittaaviin laitteisiin.



Kuva 1. Valonmittauslaboratorion laitteet ja niiden paikat.

Yksinkertaisimmillaan valonmittauslaboratorio on luksimittari ja kahden akselin suhteen liikkuva taso, jotka ovat asennettu pimeään, mieluiten valoa heijastamattomaan huoneeseen. Kaksi tämän opinnäytetyön käsittelemää laitetta, nimeltään laite 1 ja laite 3, ovat juuri esimerkin kaltaisia laitteita. Kummassakin on X- (inklinaatio) ja Y- (atsimuutti) suuntaan portaattomasti liikkuvat kiinnikkeet, joihin valonlähde voidaan kiinnittää, sekä luksimittari, joka mittaa valon voimakkuutta joka siirtymän jälkeen. Kumpikin näistä laitteista on kytketty tietokoneeseen, joka kirjaa mittaukset muistiinsa. Laite 3 kuuluu lisäksi automaatteihin, eli se hoitaa itsenäisesti mittauksen alusta loppuun ja luo käyttäjälle valmiin tiedoston (.IES tai .LTD), jota voi käyttää valaistuksen simuloimiseen. Laite 1 vaatii ihmisen läsnäoloa. Laitessa 1 tehdään vain nopeahkoja tarkistuksia symmetrisen valokuvion antavilla toisio-optiikoilla.

Näissä nopeissa tarkistuksissa otetaan valokuvista yleensä yksi tai kaksi halkileikkausta.

Kolmas valonmittauslaboratorio pitää sisällään hieman erilaisen laitteen kuin kaksi aikaisempaa. Tämä laite 2 käyttää luksimittarin sijasta kameraa valon voimakkuuden mittaamiseen.

Laite 2 sijaitsee myös omassa pimeässä, heijastamattomassa huoneessaan. Laboratorion komponentit ovat kamera, X- ja Y-suuntiin kääntyvä taso sekä erillinen, kameran kalibrointiin tarkoitettu luksimittari. Tämäkin laite on automaatti, joten se voi toimia itsenäisesti.

3. LED VALONLÄHTEET

Yrityksessä, jonne tämä lopputyö tehdään, mitataan pelkästään led-pohjaisia valaisimia.

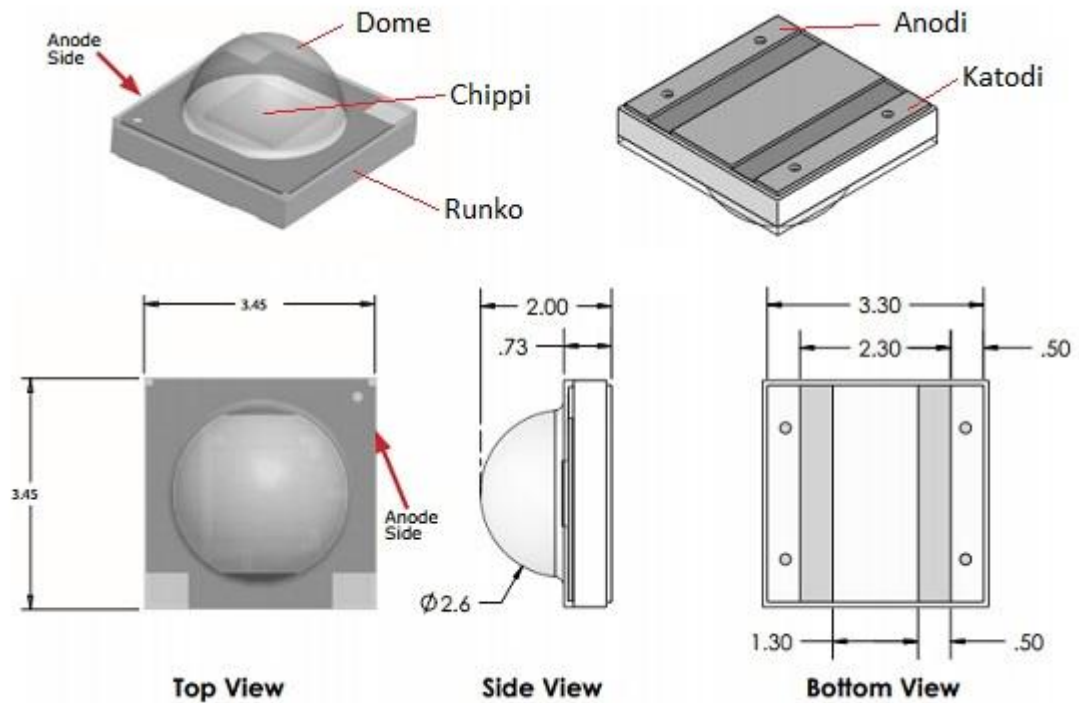
Led eli light emitting diode (loistediodi) on melko uusi valonlähde valaistusmarkkinoilla. Tällä puolijohdetekniikkaan pohjautuvalla tuotteella on hyvinä puolina koko, kesto-ikä ja pieni energiankulutus. Huonona puolena on erilaisten lämmönjohtimien ja lauhduttimien käytön pakollisuus [9].

Useat ledit pohjautuvat kolmeen osaan

- runko
- valoa tuottava puolijohde, chippi
- dome (kuva 2)

Runko näkyy kuvassa 2 suurimpana neliönä. Tämän neliön toisella puolella on chippi ja dome. Chippi tuottaa valoa, ja dome toimii ensiö-optiikkana, mikä jakaa valon halutulla tapaa. Runkoneliön takapuolella on kolme juotoskohtaa: anodi, katodi ja keskellä lämpöä pois johtava terminaali. Led on pintaliitoskomponentti, joka useimmiten juotetaan metalliseen piirilevyrakenteeseen. Metallinen

piirilevyrakenne johtaa lämpöä ledistä pois mahdollisimman tehokkaasti. Liika lämpö lyhentää ledin elinikää.



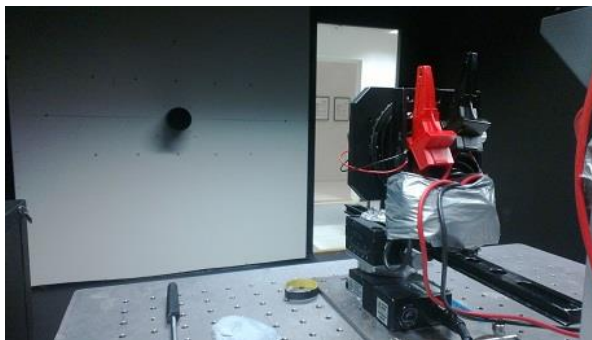
Kuva 2. Erään ledin rakenne.

4. VALONMITTAUSLABORATORIO 1

Laboratorio nro 1:n optimoinnin taustalla oli yrityksen tarve tuottaa asiakkailleen mahdollisimman tarkkaa ja vertailukelpoista tietoa mittauksista ja tuotteista.

Yrityksen hankkima laatustandardi edellytti sitä, että kalibrointia vaativat laitteet kalibroitiin. Tämän laitteen kohdalla se tarkoitti luksimittarin anturia sekä mittaria, joka lukee anturilta tulevan signaalin ja muuntaa sen lukseiksi. Näiden kahden laitteen kalibroinnin hoiti ulkopuolinen akkreditoitu laboratorio.

Laitteen 1 varustukseen kuuluu tukeva, metallisella reikälevyllä varustettu mittaustaso, jonka päälle on kiinnitetty pieni kääntyvä alusta. Lisäksi varustuksesta löytyy verhovalokuvien ottoa varten järjestelmäkamera, infrapunakamera, virtalähde ledille, tietokone sekä väliseinä, jonka taakse on kytketty varsinainen luksianturi. Mittaria ja kääntyvää tasoa ohjataan tietokoneella. Tietokoneella käsketään tasoa kääntymään tietyn verran. Käsky käy ulkoisen ohjainlaitteen kautta, joka muuttaa sen pulsseiksi. Näin pöydän moottori osaa kääntyä hyvin tarkasti halutun verran. Mitattaessa pöytää käännetään useimmiten yhden tai kahden asteen välein. Aina käännön jälkeen otetaan luksimittarilla arvo. Käännön tarkkuutta valvotaan kääntöpöytään asennetulla astekiekolla silmämääräisesti (kuva 3).



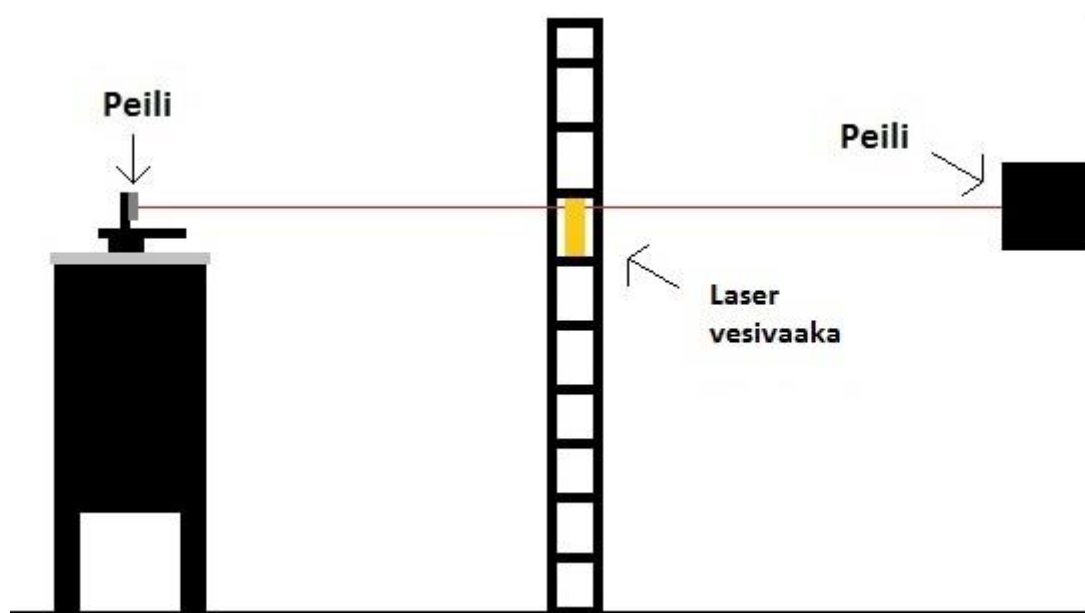
Kuva 3. Laboratorio 1 Kääntyvä taso ja luksimittari.

4.1 Optimointi

Anturin ja mittarin kalibrointi suoritettiin Saksassa akkreditoidun laboratorion toimesta.

Kalibroinnissa kävi ilmi, että mittarissa oli pieni mittavirhe, sen korjaus oli sillä hetkellä parempi vaihtoehto, kuin uuden mittarin osto. Vika korjattiin kalibroijan toimesta ja kalibrointia jatkettiin.

Kun mittauslaitteet todettiin toimiviksi ja toleranssien sisällä, aloitettiin huoneen ja kääntöpöydän yhdensuuntaisuuksien tarkastelu. Laitteen 1 kääntyvä valaisinkinnike pitää olla nolla-asennossa tarkalleen samansuuntainen kuin huoneen toisella laidalla sijaitseva mittariseinä. Tähän tehtävään käytettiin apuvälineinä muun muassa rakennustyömailla käytettävää, neljään eri suuntaan laseria lähettävää vesivaakaa, korkeussäädettävää telinettä ja kahta pientä peiliä (kuva 4).



Kuva 4. Kääntöpöydän sekä anturin seinän kohtisuoruuden tarkistus.

Peilit kiinnitettiin luksianturin etupintaan sekä kääntöpöydän tasalle, samalle kohtaa, mihin mitattava led asennettaisiin. Peilien avulla heijastettiin lasersäteet takaisin lähtöpisteeseensä. Laserlähteestä käytettiin kahta sädettä. Toinen säteistä osoitti kääntöpöytään ja toinen anturiin. Kun kumpikin säde taittui peilistä takaisin laservesivaakaan eli lähtöpisteeseensä yhtäaikaaisesti, todettiin, että kääntöpöytä ja mittaava anturi olivat kohtisuorassa toisiinsa nähden [8].

Kääntöpöytää ja sen yhteydessä olevaa mittaustasoa siirrettiin, koska ne olivat kohteistamme helpommin liikuteltavissa. Lattiaan merkattiin irtonaisen mittariseinän ja mittaustason sen hetkisen position. Merkintöjen avulla mittaustason ja seinän positiot on helppo asettaa oikeiksi siirtojen jälkeen.

5. VALONMITTAUSLABORATORIO 2

Valonmittauslaboratoriolla selvitetään mitattavan valonlähteen valokuvion mallia. Valonmittauslaboratorio 2 tuottaa 3D-tietokonemallin valonlähteen valokuviosta. Tämä laboratorio koostuu X- ja Y-suuntaan kääntyvästä levystä, valovoimamittarista, kamerasta ja tietokoneesta oheislaitteineen. Kääntyvään levyyn kiinnitetään mitattava valonlähde, jonka pitää olla keskellä ja yhdensuuntainen kameran linssiin nähden. Valovoimamittaria käytetään kertomaan kameralle ja tietokoneohjelmalle, paljonko valoa tulee kameran keskipisteeseen.

Valonlähteenä voi toimia mikä vain valoa säteilevä asia. Laboratorion tämän hetkisessä käytössä mitataan pelkästään ledien ja niiden päälle asetettavien toisiooptiikoiden tuottamaa valokuviota.

Kun mittaus aloitetaan, kiinnitetään valonlähde kiinnityslevyn keskelle ja tarkastetaan, että levy on kohtisuorassa kameraan nähden. Seuraavaksi kytketään valonlähde päälle, käännetään se osoittamaan valovoimamittaria kohden ja otetaan lukema kirkkaimmasta kohdasta. Tämän jälkeen käännetään valonlähde takaisin kohti kameraa ja suoritetaan tietokoneelta käsin

käyttäjälähtöiset kalibroinnit, joita ohjelma vaatii. Kun kaikki tämä on tehty ja uudet kalibroinnit on tarkastettu, voidaan mittaus aloittaa.

Laboratorioon kuuluu neljä pääkomponenttia (kuva 5):

- X- ja Y-suuntiin kääntyvä taso

Kääntyvä taso liikuttaa valonlähdettä siten, että se piirtää avaruuteen puolipallon. Kääntyvän tason liike tapahtuu asteittain.

- Kamera

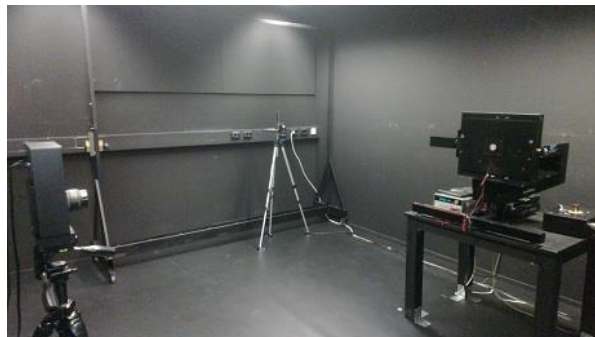
Kamera ottaa kuvan joka käännön jälkeen.

- Valovoimamittari eli luksimittari

Valovoimamittaria käytetään kertomaan kameralle ja tietokoneohjelmalle, paljonko valoa tulee kameran keskipisteeseen.

- Tietokoneohjelmalla varustettu tietokone

Tietokoneohjelma luo kameran taltioiman datan avulla 3D-mallin valokuvista. 3D-mallia voidaan käyttää valaistuksen suunnittelussa esimerkiksi Dialux-ohjelmaa hyväksikäyttäen. Dialux-ohjelmalla voidaan simuloida valaistusta haluttuihin kohteisiin hyväksikäyttämällä mitattuja .IES-tiedostoja.



Kuva 5. Laboratorio 2.

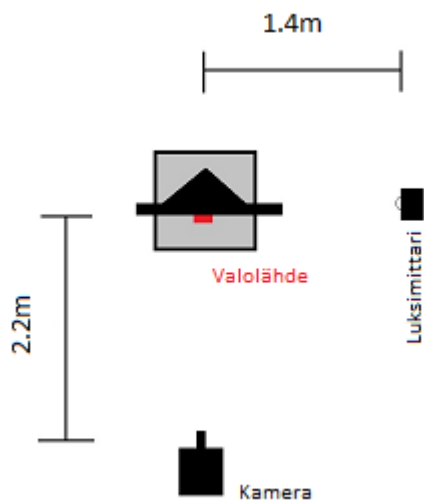
5.1 Optimointi

Valomittauslaboratorio 2 kamera on kalibroitu ulkopuolisen akkreditoidun laboratorion toimesta. Ledil Oy:n laatustandardi vaatii tämän suoritettavaksi kerran vuodessa, jotta laite tulee vastaisuudessakin olemaan tarkka. Kun mittalaitteeseen voidaan luottaa, voidaan keskittyä käyttäjälähtöisiin virheisiin ja niiden eliminointiin.

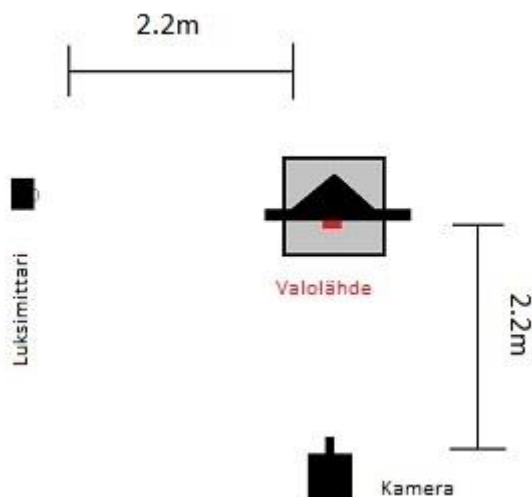
Laitteen vuosihuollon yhteydessä todettiin, että kääntöpöydässä on tarkan mittalaitteen osaksi liikaa välystä X-akselin suuntaisesti pyörivällä akselilla. Otettiin yhteyttä laitteen valmistaneeseen yritykseen, joka tarjosi ratkaisun. Ratkaisuna oli kiristää X-akselin suuntaan pyörivän akselin voimansiirtoa. Yrityksestä kerrottiin, että tämä on melko yleinen tyyppivika, joka on helppo korjata, mutta vaati hieman aikaa. Saatiin mahdollisuus tehdä korjauksen itse heidän tarjoamillaan ohjeilla. Toinen vaihtoehto oli se, että yritys olisi lähettänyt asentajan korjaamaan ongelman. Todettiin, että jälkimmäinen vaihtoehto veisi turhan paljon aikaa [12].

Saatiin ohjeet voimansiirron kiristämisestä. Ohjeet olivat englanniksi, mutta erittäin selkeät seurata. Kääntöpöytää piti purkaa, jotta alimpana olevaan voimansiirtoon pääsi käsiksi. Irti otettiin suojakatteita, Y-akselin suuntainen moottoristo mittaustason kanssa, sekä X-akselin suuntaisen voimansiirron suojalevy. Näiden alta paljastui iso hammasratas, jota liikutettiin matoruuvilla. Matoruuvin pidike oli löystynyt. Syy tähän saattoi piillä siinä, ettei kierteisiin oltu laitettu kierrelukitetta. Kun matoruuvin pidikettä kiristettiin, siirrettiin sitä myös lähemmäs isoa hammasratasta. Irtonainen teline oli aiheuttanut myös sen, että matoruuvin pidikkeen etäisyys hammaspyörästä oli muuttunut. Kokoonpanon jälkeen välyksen todettiin olevan sopiva.

Mittalaitteen neljästä pääosasta kolme sijaitsevat mustan huoneen sisällä. Huoneessa siirrettiin valovoimamittari samaan etäisyyteen, kuin mitä kamera on kääntötasosta [5] (kuvat 6–7).



Kuva 6. Ennen muutosta.



Kuva 7. Muutoksen jälkeen.

Luksimittarin paikka vaihtui seinältä vastakkaiselle, koska tila alkuperäisestä asennuspaikasta loppui kesken.

Toinen fyysinen ongelma koski valonlähteen asettamista keskelle mittauslevyä, sen kiinnitystapaa ja kiinnityslevyn väriä. Vanhan mallin mukaan, mitattava kohde asetettiin silmämäärin levyssä olevan rastin keskelle lämpöä johtavaa teippiä ja sinitarraa hyväksikäyttäen. Yleensä valonlähde ei ollut keskellä. Vanha levy oli myös kiiltävän valkoinen, mikä aiheutti tuloväärästymää ja

ylimääräistä valosaastetta tuloksen 3D-malliin. Osassa tuotteista on mahdollista, että valo taittuu hieman linssistä taaksepäin. Valkoinen taustalevy mahdollisti säteen taittumisen takaisin tulosuuntaansa ja siitä kameraan. Uusi mittauslevy on kaksiosainen. Kummatkin osat ovat käytännössä heijastamattomia ja mattamustia. Isompi osa on tarkoitettu käytettäväksi tilapäiseen, suuren valonlähteen mittaamiseen. Isompaan kiinnitetään pienempi levy, jossa on yleisesti käytettyjen led-piirikorttien kiinnitysreiät kierteillä valmiina [5] [6].

Ohjelmistopuoleen tehtiin käyttäjälähtöiset, pitkän toimintavälin kalibroinnit uudelleen. Tämä käsittää käytännössä vain seuraavan toimenpiteen: kamera käynnistetään. Mittauslevyn päälle valonlähteen tilalle asetetaan viivain. Viivaimessa on metrinen pituusasteikko. Ohjelmistolle osoitetaan, että tietty etäisyys kameran näkökentässä olevassa, viivaimen asteikossa, on tietty pituus, esimerkiksi 30 cm. Kun ohjelmisto tietää, että tietty matka kameran näkökentässä on tietyn mittainen, se pystyy laskemaan, kuinka etäällä kameran kenno on kohteesta. Näin voidaan määrittää tarkalleen kameran paikka, mikä on mittauksen kannalta tärkeää [1].

Ohjekirjasta kävi ilmi, että kameran näkymä kuvattavaan kohteeseen pitää olla epätarkka. Jos kamera on täysin tarkennettu kohteeseen, kuten normaalissa valokuvanottotilanteessa, se häikäistyy valonlähteen aiheuttamasta piikistä, eikä pysty havainnoimaan kunnolla muuta osaa valokuvasta. Näin kokonaisvalovirta jää totuutta huomattavasti alhaisemmaksi [1].

6. VALONMITTAUSLABORATORIO 3

3 on 1:sen tavoin luksimittariin ja kääntöpöytään perustuva valonmittauslaboratorio. Kääntöpöydän ja luksimittarin lisäksi kalustoon kuuluvat tietokone, virtalähde ja ohjainlaitetorni.

Kääntyvä taso koostuu kahdesta, 360 astetta kääntyvästä akselista, joiden avulla kiinnitettyä valonlähdettä voidaan kääntää. Valonlähteen kiinnitys tapahtuu sorvista tutulla, kolmileukaisella pakalla. Pakka on pieni ja siinä on ulko- ja sisätartunnalle omat vaihdettavat leuat.

Kun valonlähdettä kiinnitetään kääntöpöydän leukoihin, kiinnitetään valolähde ensin levyille, jossa on reiät ruuvikiinnitystä ja keskittämistä varten. Tämä rakennelma kiinnitetään leukoihin.

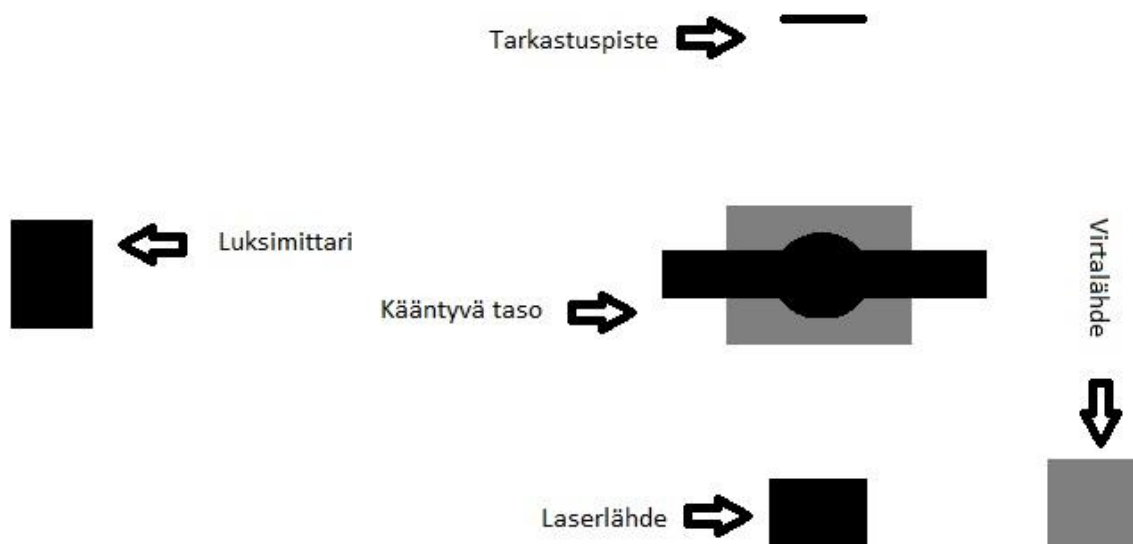
Kiinnitysleukojen etäisyyttä toisen pyörähdysakselin keskiöstä voidaan muuttaa, jotta valonlähteen pinta on akselin keskipisteessä.

Valonlähteen oikea paikka huoneessa saadaan helposti selville seinään kiinnitetyn laseraseman kanssa. Laserasema luo kummankin pyörähdysakselin leikkauspisteeseen rastin, jonka keskelle mitattava valonlähde pitää osua (kuva 8).

Laitekokonaisuuden hallintaan käytetään tietokonetta, johon on asennettu mittausohjelma. Tämä ohjelma vaatii toimiakseen USB-tikun, jossa on lisenssitiedot.

Mittausohjelmalla voidaan määrittää, millaisella tarkkuudella kukin valonlähde mitataan. Pienikokoisilla, symmetrisen valokuvion tuottavilla optiikoilla mitattaessa, käännöt voivat olla 1 aste X-suuntaan ja 10 astetta Y-suuntaan. Jokaisen käännön jälkeen otetaan luksimittarilla lukema. Laitteella mitataan kumpaakin akselia 0–180 asteen kaistale. Kun mittaus on valmistunut, ohjelmisto vetää yksittäisten mittaustulosten arvot yhteen, ja luo kolmiulotteisen mallin valokuvioista. Mallin tiedostopäätteen voi valita muutamasta

vaihtoehdosta, esimerkiksi .IES tai .LDT. Näillä tiedostoilla voi toteuttaa valaistussuunnittelua. 3D-mallin lisäksi ohjelmisto ilmoittaa mitatun valonlähteen puoliarvokulman sekä piikin arvon.



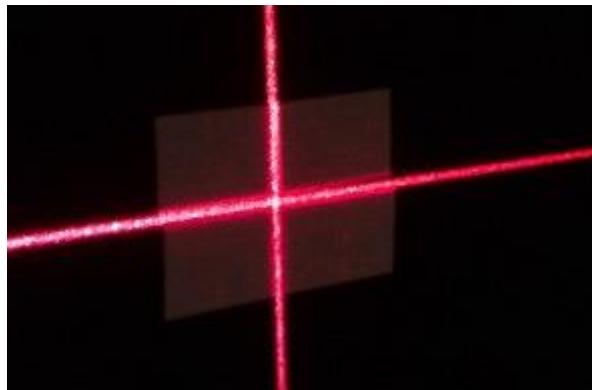
Kuva 8. Laboratorio 3 kokoonpano.

6.1 Optimointi

Laitekokonaisuus on hankittu taloon kesällä 2012, ja sen on asentanut tehtaan kokenut työntekijä, joka kiertää aina asiakkaan luona asentamassa ja suorittamassa käyttöönottestauksen. Laitteen tehdaskalibrointi on vuoden voimassa, joten sitä ei tarvinnut uudelleen kalibroida tämän lopputyön teon aikana.

Lähtökohdat optimointiin olivat erittäin hyvät. Muista yrityksen laitteista poiketen, tämän oli asentanut ja käyttöönottanut tehtaan oma valtuutettu ammattilainen. Laitteen pääkomponentit oli asennettu kiinteästi lattiaan oikeille etäisyyksille tehtaan edustajan toimesta, joten niistä ei jäänyt mitään tarkastettavaa. Laitehuoneen seinälle lisättiin tarkastuspiste, josta voi tarkastaa, että laserasema osoittaa aina oikeaan kohtaan (kuva 9). Jos aseman lähettämät lasersäteet eivät osoita tarkalleen kääntötason kahden pyörähdysakselin

risteymäkohtaan, ei mitattavaa valonlähdettä saada tarkalleen haluttuun paikkaan.

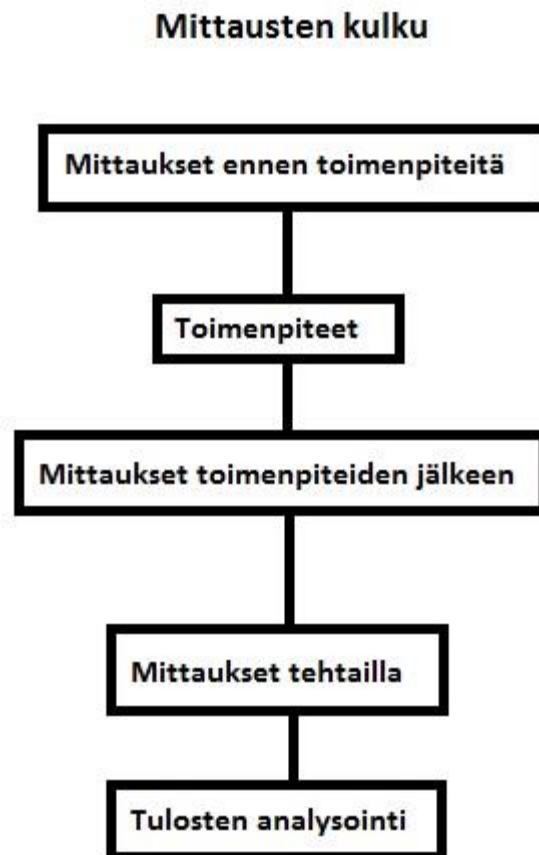


Kuva 9. Keskipisteen laserkohdistus.

7. MITTAUKSIA

Tähän opinnäytetyöhön kuului optimointien toteuttamisen lisäksi mittauksia valmiilla laitteilla. Näillä mittauksilla halutaan tuoda julki laitteiden eroja lopputuloksen eli mitatun datan silmin. Jokainen näistä laitteista toimii paljolti eri tavalla kuin toinen. Laboratorio-olosuhteet saattavat erota käytännön käyttöympäristöstä ja näin aiheuttaa hieman hajontaa ja vaihtelua mittatuloksissa.

Talon sisäisten laitteiden lisäksi kartoitettiin alihankkijan tuotantolaitoksessa sijaitsevan laboratorion vertailukelpoisuutta (kuva 10).



Kuva 10. Mittausten kulku.

Ennen mittausten aloittamista, laitteet oli kalibroitu, ja optimoinnit suoritettu loppuun.

Mittauksissa käytettiin led-valmistajan kalibroitua lediä. Tähän mittaukseen laitteiden tuottamia mittauksia verrattiin.

Käyttäen hyödyksi kertynyttä mittaustietoa ja kokemusta lukuisista konsepteista ja erilaisista mittauksista, määriteltiin miten mittaukset pitäisi suorittaa, jotta tulokset olisivat oikeita. Päädyttiin aloittamaan siitä, että mitattiin jokaisessa laboratoriossa pelkkä led viiteen kertaan. Kun mittaukset on tehty, voitiin päätellä, miten hyvin mittaukset ovat toistettavissa kullakin laitteella. Päädyttiin käytäntöön, jossa led irroitettiin mittauslaitteistosta jokaisen mittauksen jälkeen. Näin saatiin jäljiteltävä tosielämän tilanne, jossa led irroitetaan ja vaihdetaan toiseen joka mittauksen jälkeen. Irroituksen yhteydessä positio ja ledin sisälämpötila muuttuu aina hieman.

Käytetty led ja optiikat tuottavat teoriassa pyöreän ja symmetrisen valokuvion. Tämä symmetrisyys käy ilmi, kun mittauspisteet on laitettu visuaaliseen muotoon eli valonjakaumakäyräksi. Kun valokuviot ovat symmetriset, on ollut yleinen käytäntö käyttää valonjakaumakäyrän muodostamiseen vain yhtä läpileikkausta valokuvioista. Käytännössä jokainen led ja jokainen linssi on hieman epäsymmetrinen, joten käytettiin kahta läpileikkausta. Nämä läpileikkaukset ovat kohtisuoria, ja kulkevat mitatun alan keskipisteen kautta. Mitatun alan keskipiste ei ole sama asia, kuin valokuvion keskipiste. Valokuvio voi olla hieman vinossa eli poissa mitatun alueen keskipisteestä. Tämä voi johtua epätarkasta ledin paikoituksesta mittaustalustalla tai linssin epäsymmetrisyydestä.

Mittaustuloksista kävi ilmi, että toistettavuus laboratorioissa oli erinomainen. Eroja käyriin tai kulmiin ei saatu aikaiseksi. Käyristä kuitenkin näki, että pelkän ledin valokuviossakin oli lievää epäsymmetrisyyttä (liitteet 1–3).

Kun mittausten toistettavuus oli todettu, pystyttiin käyttämään näitä mittaustuloksia hyödyksi myös seuraavassa vaiheessa. Vaihe käsitteli laboratorioden keskinäistä eroa, kun kyseessä oli todella leveä valokuvio.

Koska ledin mittaussiivut olivat aina samat ja led hieman epäsymmetrinen, päätettiin laskea tuloksista keskiarvot ja vertailla näitä keskenään. Tässä vertailussa on mukana myös ulkopuolinen valonmittauslaboratorio (taulukot 1–2). Vertailussa on tarkasteltu huippuarvoa, puoliarvoa ja 10 % arvoa (liite4).

Taulukko 1. Pelkän ledin keskiarvoistamaton taulukko.

LED					
Mittaussiivu	Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
0-180deg	Ulkop.	=	43,3	115	171,5
90-270deg	Ulkop.	=	43,08	120	173,5
0-180deg	3	=	39,69	118	172,5
90-270deg	3	=	39,57	115	171,5
0-180deg	2	=	38,74	114	170
90-270deg	2	=	38,74	118	172,5
0-180deg	1	=	38,88	115,5	176,5
90-270deg	1	=	38,72	119,5	178

Taulukko 2. Arvot ovat keskiarvoistettu.

Keskiarvo				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Ulkop.	=	43.19	117.5	172.5
3	=	39.63	116.5	172
2	=	38.74	116	171.25
1	=	38.8	117.5	177.25

Näistä tuloksista pystyttiin laskemaan eroavaisuuksia. Tavoitteena oli saada julki prosentuaalinen tieto, paljonko mikäkin laboratorio poikkeaa asetettuun verrokkiin nähden. Asetettu verrokki tässä kohtaa oli ulkopuolinen valonmittauslaboratorio.

Huomio kiinnittyi huippuarvojen variaatioon. Led-valmistajan laboratorio on mitannut noin 10 % enemmän valoa huippuarvossa kuin talon sisäiset laboratoriot. Talon sisäisten laboratorioiden virhemarginaali on parin prosenttiyksikön luokkaa, eli ne ovat yhtenevät.

Kulma-arvojen erot ovat vähäiset (taulukko 3)

Taulukko 3. Eroavaisuudet prosentteina verrattuna ulkopuoliseen laboratorioon.

Ero %				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
3	=	8.20 %	0.90 %	0.30 %
2	=	10.30 %	1.30 %	0.70 %
1	=	10.20 %	0.00 %	2.70 %

Seuraavaksi vuorossa on mittaukset ja vertailut linssien kanssa. Linsseinä toimivat yrityksen melko pienikokoiset tuotteet. Led on juotettu piirikortille, joka tässä tapauksessa on pieni ja hankalasti käytettävä. Siitä puuttuivat normaalissa piirikortissa olevat linssin paikoitusreiät. Nämä ominaisuudet vaativat toisio-optiikalta pientä kokoa. Tälle ledityypille sopivia, kooltaan pientä ja paikoitustapittomia toisio-optiikoita ei ole yrityksen tuotevalikoimassa. Otettiin käyttöön paikoitustapillinen tuote ja hiottiin tapit pois. Tämä muodonmuokkaus ei vaikuttanut valokuvioon. Se teki optiikan asentamisesta ledin päälle keskelle hieman haastavan, mutta tuloksien valossa ei huomattu, että tällä olisi ollut vaikutusta.

Vertailumittauksien kohteiksi valittiin kolme eri linssiä. Jokainen näistä linseistä tuottaa erilaisen puoliarvon. Valokuvion A mittaaminen näyttää tulosten valossa olevan hankalinta. Tästä kertovat vertailun suurimmat eroprosentit matalimman ja korkeimman arvon välillä. Näitä tuloksia käsiteltäessä eroprosentti laskettiin valokuvion kahden halkileikkauksmittauksen keskiarvosta (taulukot 4–6). Tässä tutkimuksessa on vertailtu kolmen valonmittauslaboratorion korkeinta ja matalinta mitattua arvoa keskenään. Kiinteää verrokkia ei ole. Verrokki on tapauskohtainen (liite5).

Taulukko 4. Valokuvio A.

Valokuvio A			Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Laboratorio	Mittaussiivu				
3	0-180	=	1134,58	13,5	27
3	90-270	=	1130,89	13,5	30
2	0-180	=	1237,76	14	29,5
2	90-270	=	1248,36	14	26,5
1	0-180	=	1184,91	13,5	30
1	90-270	=	1186,84	12	28

Taulukko 5. Keskiarvoistetut arvo.

Valokuvio A		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Laboratorio				
3	=	1132,74	13,5	28,5
2	=	1243,06	14	28
1	=	1185,88	12,75	29

Taulukko 6. Eroprosentit.

Ero %	Piikki	8,90 %
	Puoliarvo	8,90 %
	10 % arvo	3,40 %

Erojen julkituontia jatkettiin valokuvio B:n optiikalla. Tämän tuotteen kohdalla eroprosentit olivat huomattavasti pienemmät kuin edellisessä tapauksessa. Huippuarvon kohdalla eroa vielä jäi mainittavasti, mutta kulmat ovat käytännössä identtiset (taulukot 7–9) (liite6).

Taulukko 7. Valokuvio B.

Valokuvio B			Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Laboratorio	Mittausiivu				
3	0-180	=	298,06	29,5	54
3	90-270	=	298,37	31	54,5
2	0-180	=	307,23	31	54,5
2	90-270	=	307,23	30	54,5
1	0-180	=	320,69	31	54
1	90-270	=	321,07	30	53

Taulukko 8. Keskiarvoistetut tulokset.

Valokuvio B				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
3	=	298,22	30,25	54,25
2	=	307,23	30,5	54,5
1	=	320,88	30,5	53,5

Taulukko 9. Eroprosentit.

Ero %	Piikki	7,10 %
	Puoliarvo	0,80 %
	10 % arvo	1,80 %

Viimeinen vertailumittaus suoritettiin valokuvio C:n kulman omaavalla optiikalla. Tämän optiikan kohdalla huomattiin, ettei valokuvio ole symmetrinen. Valokuvion huippuarvo ei ole keskellä valokuviota, vaan kiertää keskustaa. Tämän linssin kohdalla päästiin erittäin pieniin eroprosentteihin mittalaitteiden välillä. Jopa huippuarvon poikkeama jää alle kahteen prosenttiin (taulukot 10–12) (liite7).

Taulukko 10. Valokuvio C.

Valokuvio C			Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Laboratorio	Mittaussiivu				
3	0-180	=	132,94	54	76,5
3	90-270	=	123,6	56,5	77
2	0-180	=	129,41	54	76
2	90-270	=	126,03	55	76
1	0-180	=	139,63	54	75
1	90-270	=	120,7	57	76

Taulukko 11. Keskiarvoistetut tulokset.

Valokuvio C		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Laboratorio				
3	=	128,27	55,25	76,75
2	=	127,72	54,5	76
1	=	130,17	55,5	75,5

Taulukko 12. Eroprosentit.

Ero %	Piikki	1,90 %
	Puoliarvo	1,80 %
	10 % arvo	1,60 %

Viimeisenä vaiheena tarkastettiin automaattien, eli 2 ja 3 tuottamat arviot hyötysuhteesta. Yrityksestä löytyy hyötysuhteen mittaamiseen tarkoitettu integroiva pallo. Sen sisäpinta on päällystetty materiaalilla, jonka heijastuskerroin on yli 97 %. Pallossa on kiinni mittapää ja mittapään dataa

tulkitseva lukija, joka kertoo käyttäjälleen pallossa olevan valonmäärän lumeneina. Hyötysuhdetta mitattaessa otettiin arvot pelkällä ledillä ja led+linssi yhdistelmällä.

2 ja 3 arvioivat mikä linssin hyötysuhde on. Tuloksista käy ilmi, että 3 arvioi hyötysuhteen hyvin lähelle todellisuutta.

Taulukko 13. Hyötysuhteet mitattuna integroivassa pallossa.

Hyötysuhteet	
Integroiva pallo	
Valokuvio A	88.00 %
Valokuvio B	83.50 %
Valokuvio C	85.90 %

Taulukko 14. Hyötysuhteet arvioituna 3:ssa.

Laboratorio 3	
Valokuvio A	89.57 %
Valokuvio B	84.08 %
Valokuvio C	85.42 %

Taulukko 15. Hyötysuhteet arvioituna 2:ssa.

Laboratorio 2	
Valokuvio A	88.97 %
Valokuvio B	79.08 %
Valokuvio C	81.05 %

Taulukko 16. Automaattien arvioimien hyötysuhteiden eroprosentit verrattuna integroivaan palloon.

Ero%	3	2
Valokuvio A	1.10 %	1.80 %
Valokuvio B	5.30 %	0.70 %
Valokuvio C	5.60 %	0.60 %

Kun kaikki talon sisäisiin laitteisiin kohdistuvat mittaukset olivat tehty ja analysoitu, päätettiin aluetta vielä hieman laajentaa. Linssitehtailla on vielä yksi valonmittauslaboratorio, jota pystyttäisiin hyödyntämään mittauskapasiteetissa. Tämän laboratorion yhdenvertaisuutta talon sisäisiin laitteisiin verraten päätettiin tarkastella. Samat linssit ja led, jotka yrityksessä mitattiin, lähetettiin heille. Siellä niille suoritettiin samat mittaukset paikallisen henkilökunnan voimin. Työnanto ja avustus suoritettiin sähköpostia hyväksikäyttäen.

Tuloksia vertaillessa kävi ilmi, että yksi mittaus poikkeaa puoliarvoltaan paljon muista. Tämän syytä ei ole tiedossa, koska mittauksen suoritti laitteen omistavan yrityksen oma henkilökunta (taulukko 17) (liite8).

Taulukko 17. Pelkkä led mitattuna tuotantolaitoksen laboratoriossa viiteen otteeseen.

Led			Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Mittaus1	=		33,00	124,70	162,60
Mittaus2	=		32,97	120,80	157,30
Mittaus3	=		33,01	121,90	158,90
Mittaus4	=		32,98	120,70	157,20
Mittaus6	=		33,00	128,10	164,70

Pelkkää led-mittausta verrattiin myös talon sisäisesti mitattuihin. Tulokset poikkesivat toisistaan. Tehtaalla tehdyistä mittauksista käytettiin mittauksen 1–4 keskiarvoa (taulukot 18–19). Laboratorioita on verrattu ulkopuolisen tahon tuottamiin tuloksiin (liite4).

Taulukko 18. Pelkän led mittauksen tulokset.

Keskiarvo			Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Laboratorio					
Ulkop.	=		43,19	117,5	172,5
3	=		39,63	116,5	172
2	=		38,74	116	171,25
1	=		38,8	117,5	177,25
Tehdas	=		33	122	159

Taulukko 19. Eroprosentit verrattuna ulkopuolisen tahon tuottamiin tuloksiin.

Ero %				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
3	=	8,20 %	0,90 %	0,30 %
2	=	10,30 %	1,30 %	0,70 %
1	=	10,20 %	0,00 %	2,70 %
Tehdas	=	23,60 %	3,70 %	7,80 %

Tehtaan mittauksiin kuuluivat myös mittaukset optiikalla. Optiikka on täysin sama, millä talon sisäiset mittaukset suoritettiin. Tehtaan tuloksia verrattiin talon sisäisten laitteiden tuottaman tiedon keskiarvoon. Tuloksista kävi ilmi, että eroja on olemassa. Syy tähän ei ole tiedossa, koska mittaukset suoritettiin laitteen omistavan yrityksen oma henkilökunta. (taulukot 21–23) (liitteet 5–7).

Taulukko 20. Tehtaan laboratorion tulokset valokuvio A-optiikalla verrattuna talon sisäisten tulosten keskiarvoon.

Valokuvio A				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Talon sisäiset	=	1187,2	13,4	28,5
Tehdas	=	997,6	14,0	30,0

Ero%	Piikki	16,50 %
	Puoliarvo	4,30 %
	10 % arvo	5,00 %

Taulukko 21. Tehtaan laboratorion tulokset valokuvio B-optiikalla verrattuna talon sisäisten tulosten keskiarvoon.

Valokuvio B				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Talon sisäiset	=	308,8	30,4	54,1
Tehdas	=	267,5	31,0	55,5

Ero%	Piikki	13,40 %
	Puoliarvo	1,90 %
	10 % arvo	2,50 %

Taulukko 22. Tehtaan laboratorion tulokset valokuvio C-optiikalla verrattuna talon sisäisten tulosten keskiarvoon.

Valokuvio C				
Laboratorio		Huippu (cd)	Puoliarvo	10 % arvo
Talon sisäiset	=	134,0	54,0	75,8
Tehdas	=	157,6	37,0	71,0

Ero%	Piikki	15,00 %
	Puoliarvo	31,50 %
	10 % arvo	6,30 %

8. YHTEENVETO

Näiden tulosten valossa pidän talon sisäisiä kolmea laboratoriota hyvässä suhteessa toisiinsa. Kapean valokuvion erot saattavat tässä kohtaa selittyä laitteiden rakenteellisesta erilaisuudesta. Jokainen laite on eri valmistajalta ja ne ovat täysin eri muotoisissa ja kokoisissa huoneissa. Mittausten toistettavuus oli ihanteellista luokkaa. Tämä on hyvä asia siksi, että tuotteen voi kerralla mitata luotettavasti. Tämä säästää huomattavasti aikaa.

Tehtyjen mittausten ja analyysien perusteella havaittiin vaihtelua tuotannon mittauslaboratorion ja tuotekehityksen laboratorion välillä. Tämän vaihtelun eliminoimiseksi on korjaavat toimenpiteet suunnitteilla ja merkittävä rooli on mm. operaattorien perehdytyksellä ja säännöllisillä vertailumittauksilla.

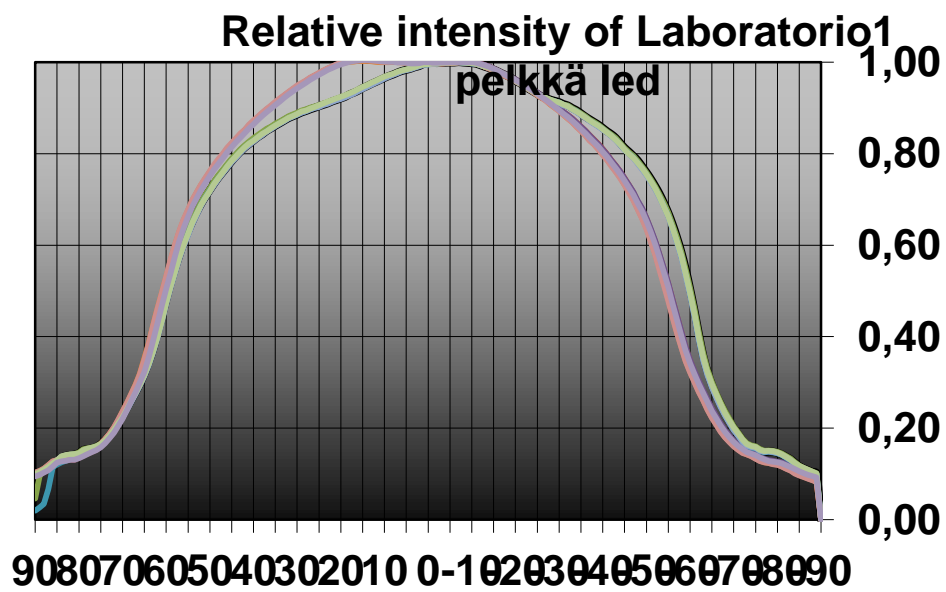
Projekti sujui hyvin. Kysymyksiini sain apua kollegoilta. Jos sama projekti pitäisi suorittaa uudestaan pyrkisin olemaan siistimpi. Näin yhteenvedon hetkellä tiedot olisivat helpommin käsillä.

LÄHTEET

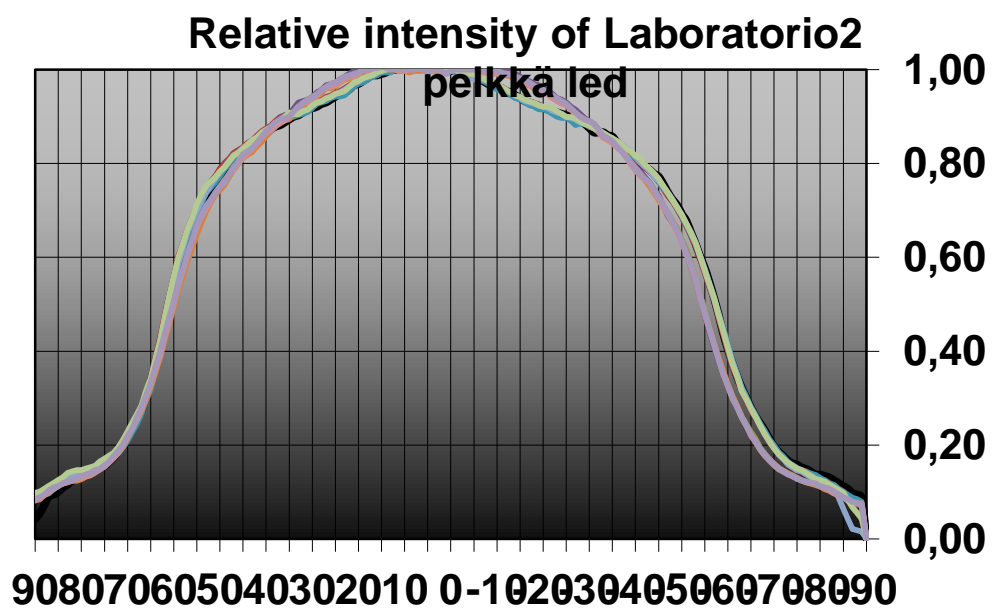
1. Valonmittauslaboratorio 2 ohjekirja
2. [WWW-dokumentti] Luksi 2012, viitattu 21.11.2012
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Luksi>
3. [WWW-dokumentti] Kandela 2012, viitattu 21.11.2012
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Candela>
4. [WWW-dokumentti] Lumen 2012, viitattu 21.11.2012
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Lumen>
5. Käyty keskustelu laboratoriopäällikkö Teemu Tulosen kanssa.
 21.11.2012
6. Käyty keskustelu application engineering manager Juha Röhkiön kanssa
 21.11.2012
7. [WWW-dokumentti] Laser 2013, viitattu 12.3.2013
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Laser>
8. Käyty keskustelu laboratoriopäällikkö Teemu Tulosen kanssa
 10.12.2013
9. [WWW-dokumentti] Tietoa ledeistä 2013, viitattu 16.3.2013
http://www.valosto.com/tiedostot/LedifaktojaValomessut%202009_1.pdf
- 10.[WWW-dokumentti] Tietoa Ledil Oy:stä 2013, viitattu 16.3.2013
<http://www.pwc.fi/fi/perheyrittyspalvelut/kasvuyrittaja-odottaa-kumppaniltaan-proaktiivisuutta-ja-nopeutta.jhtml>
- 11.Käyty keskustelu laboratoriopäällikkö Teemu Tulosen kanssa 15.1.2013
- 12.Käyty keskustelu application engineering manager Juha Röhkiön ja laboratoriopäällikkö Teemu Tulosen kanssa 21.11.2012

LIITTEET

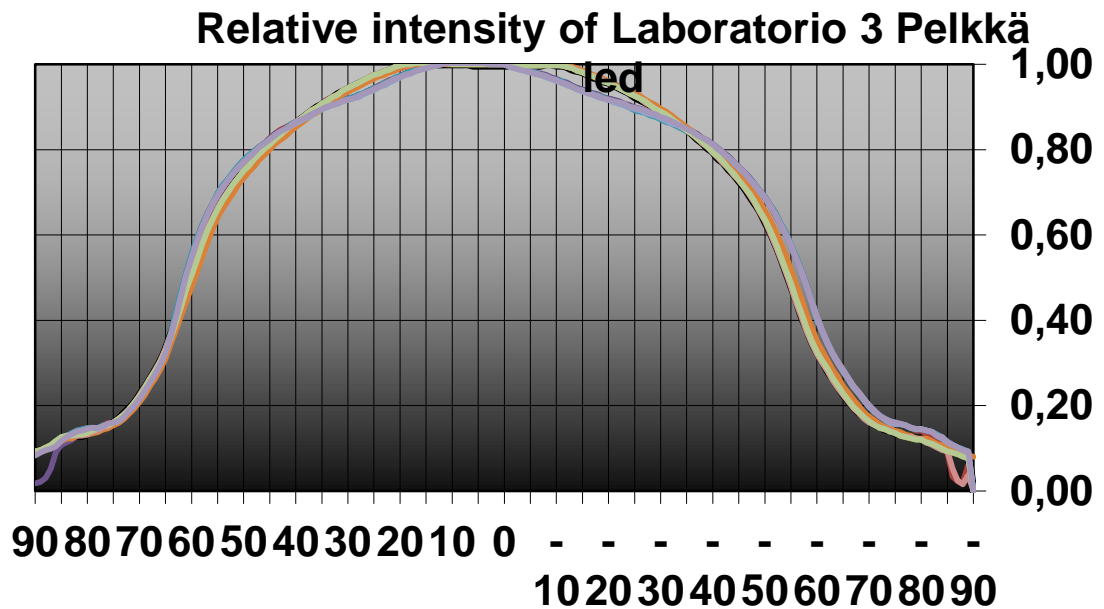
Liite 1: Valonmittauslaboratorio 1 pelkkä led. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



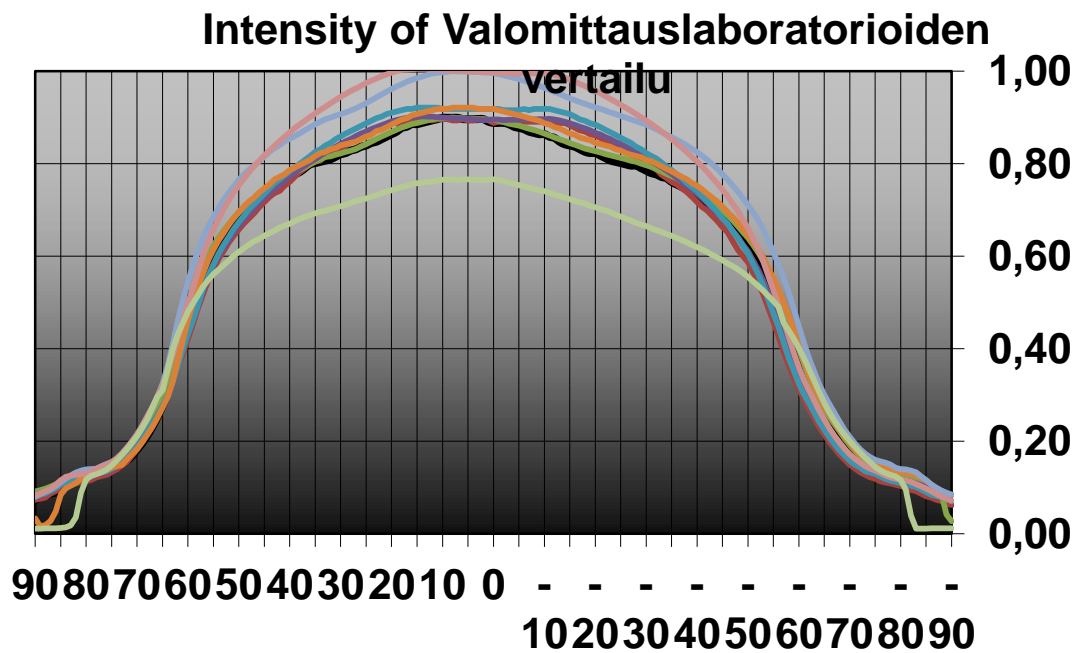
Liite 2: Valonmittauslaboratorio 2 pelkkä led. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



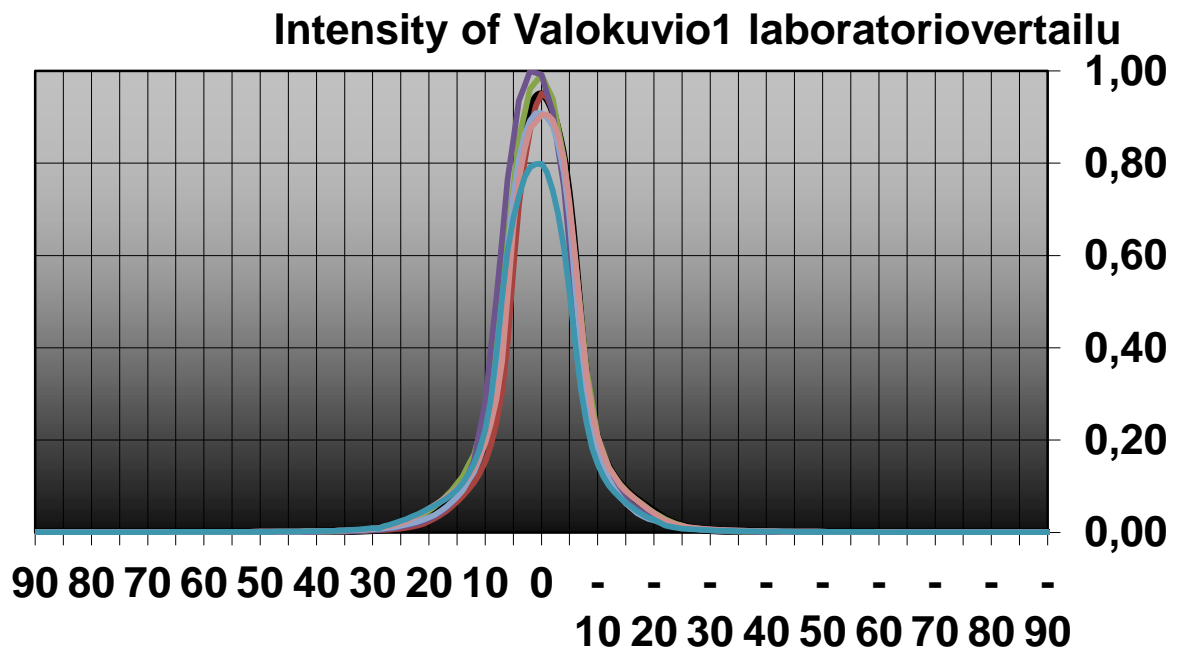
Liite 3: Valonmittauslaboratorio 3 pelkkä led. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



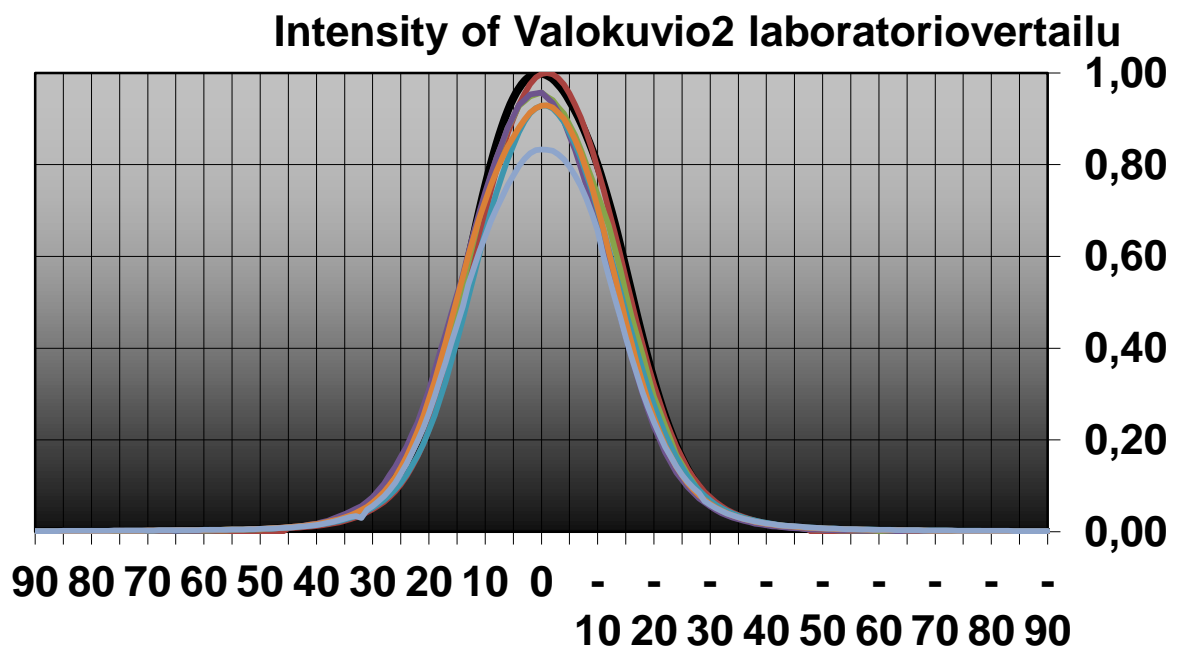
Liite 4: Valonmittauslaboratorioiden vertailu pelkkä led. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



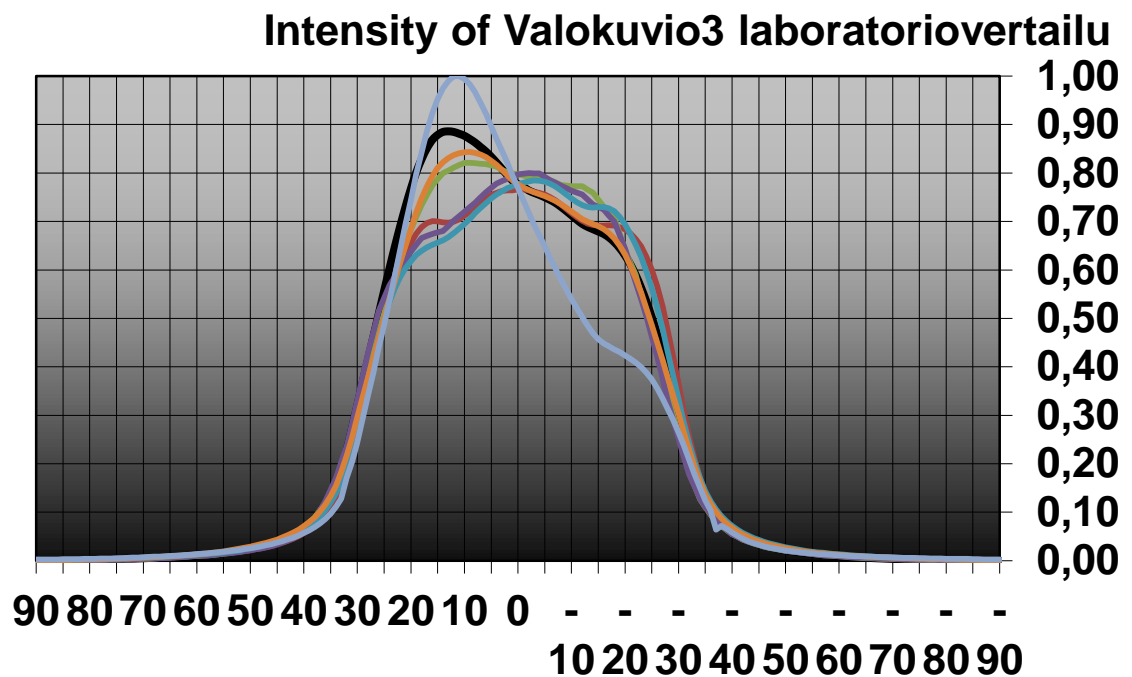
Liite 5: Valokuvio1 laboratoriovertailu. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



Liite 6: Valokuvio 2 laboratoriovertailu. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



Liite 7: Valokuvio 3 laboratoriovertailu. Jokainen väri edustaa eri mittausta.



Liite 8: Tehtaan viiden mittauksen vertailu pelkällä ledillä. Jokainen väri edustaa eri mittausta.

